

文章编号: 2096-1618(2024)06-0733-06

# 北大西洋涛动对中国东北地区冬季气温的影响

范子璇<sup>1</sup>, 华 维<sup>1,2,3</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 3. 四川省气象灾害预测预警工程实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**为分析近几十年来北大西洋涛动(North Atlantic oscillation, NAO)对中国东北地区冬季气候的影响, 利用1969–2019年CN05.1高分辨率格点气温资料、NCEP/NCAR再分析资料及NAO指数, 采用经验正交分解、相关分析和合成分析等方法对中国东北地区冬季气温受冬季NAO的影响进行分析。结果显示: (1) NAO与中国东北地区冬季气温之间存在密切联系, 即当冬季NAO为正异常时, 中国东北地区冬季气温偏高, 反之亦然。 (2) 东亚冬季大气环流受冬季NAO传播至东亚地区的波动所影响, 波活动通量强辐散区主要位于北大西洋地区, 其水平波作用量存在向东的传播路径, 向南传播至北非地区后向北传播亚洲西部地区, 而后向东亚地区传播并向南传播至太平洋地区。 (3) 冬季北大西洋涛动异常会通过影响对流层环流因子从而影响中国东北地区冬季气温, 具体表现为当北大西洋涛动正异常时, 导致东亚北部上空位势高度正异常, 东亚冬季风减弱, 且此时对流层中低层存在反气旋环流, 以下沉运动为主, 导致中国东北地区气温偏暖, 而当北大西洋涛动负异常时情况则相反。

**关键词:** 北大西洋涛动; 东北地区; 冬季气温; 气候变化; 时空特征

**中图分类号:** P425

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.013

## 0 引言

北大西洋涛动是北大西洋地区最为显著的大气模态之一, 其实质为位于北大西洋地区的副热带高压和副极地低压之间大气质量的跷跷板式低频振荡。当NAO处于正(负)位相时, 即当NAO偏强(弱)时, 位于大西洋北部的冰岛低压与位于副热带地区的亚速尔高压均异常偏强(弱)<sup>[1]</sup>。NAO对全球气候有重要影响, 其中对气候的影响主要集中于北大西洋、欧洲和北美地区<sup>[2-3]</sup>, 当NAO处于正位相时, 格陵兰岛以西和北美洲东北部偏冷、美国东部以及欧洲北部偏暖, 地中海地区降水偏少, 而欧洲北部降水偏多, 当NAO处于负位相时则相反<sup>[3]</sup>。此外, 有研究表明, NAO的强弱对波罗的海、格陵兰海海冰也有着较为明显的影响<sup>[4-6]</sup>。Ignacio等<sup>[7]</sup>发现冬季NAO变化对欧洲南部干旱有不同的影响, 当NAO处于正(负)位相时, 欧洲南部降水偏少(多)降水, 而欧洲北部与之相反。Folland等<sup>[8]</sup>发现, 夏季NAO可以通过改变北大西洋地区风暴路径, 从而影响北欧地区降水、气温和云量。

除与大西洋和欧洲气候有重要关系外, NAO还可对下游欧亚大陆气候形成一定影响。龚道溢等<sup>[9-10]</sup>指

出, NAO与其他大气涛动共同影响全球大气环流且对全球低层大气环流异常有重要贡献, 而NAOI有着突出的年代际变化且近20年来冬季NAO在持续加强。Hurrell等<sup>[11-12]</sup>也发现, NAO的异常可以很好地解释北大西洋海表温度(sea surface temperature, SST)的变冷及欧亚大陆增温。Ogi等<sup>[13]</sup>认为冬季NAO异常信号可以延续到夏季, 影响途径主要为海冰、海表温度和雪盖, 并在一定程度上调制了夏季北半球中高纬地区气候。Yu等<sup>[14]</sup>认为, 近50a以来, 前期冬季NAO正位相增强会导致半球副热带冷信号东传, 从而改变早春季节欧亚大陆副热带地区上空气温的变冷趋势。

许多学者在NAO对中国气候的影响方面进行了深入研究。王永波等<sup>[15]</sup>研究了冬季NAO与中国冬、夏季气候变化的关系, 并发现NAO强年中国冬季偏暖、多雨, 而江淮地区夏季气温则有所偏低。Liu等<sup>[16]</sup>发现, 青藏高原东部地区夏季降水的时空分布受到夏季NAO异常引起的对流层纬向风变化的影响。汪迁迁<sup>[17]</sup>发现NAO与东亚地区气候存在明显的相关性, 且因季节不同, 对冬夏两季东亚地区的气候影响也不同。韩方红等<sup>[18]</sup>发现在20世纪80年代中期前, 东北后冬冷日(夜)频发, 与NAO的相关性较好, 而在80年代中期后东北后冬冷日(夜)少发, 与NAO的相关性减弱。邵太华等<sup>[19]</sup>发现, 中国春季降水与前期冬季

收稿日期: 2023-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42075019); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK010203)

通信作者: 华维. E-mail: huawei@cuit.edu.cn

NAO 关系密切,冬季 NAO 偏强(弱)时,中国南方地区春季降水偏多(少),北方降水偏少(多)。唐红玉等<sup>[20]</sup>利用奇异值分解分析了中国北方春季沙尘暴频数与北半球500 hPa高度场的关系,发现中国春季北方沙尘暴发生的次数受前一年冬季 NAO 的影响。陈颖等<sup>[21]</sup>发现,冬季 NAO 可以通过影响欧亚(EU)波列的传播从而影响新疆冬季极端冷事件的变化。

不同季节 NAO 对中国不同地区的影响存在明显差异。此外,以往研究多集中在前期 NAO 对后期中国气候的影响,而对 NAO 对同期气候的研究相对较少。因此,本文对 1969–2019 年冬季 NAO 对中国东北地区气温的可能影响进行分析,并讨论其相关的物理机制。

## 1 资料与方法

本文所用资料包括:(1)美国国家环境预测中心和国家大气研究中心提供的月平均再分析资料,所采用的要素包括水平风、垂直速度、海平面气压(surface level pressure, SLP)和位势高度等,其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ <sup>[22]</sup>。(2)吴佳等<sup>[23]</sup>研制的中国高分辨率格点气象数据集(CN05.1),水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。(3)NAO 指数为美国大气和海洋管理局气候预测中心提供的逐月月平均 NAO 指数(NAO Index, NAOI),本文定义的冬季 NAO 指数为每年 12 月至次年 2 月 NAO 指数平均值,冬季指 12 月到次年 2 月,研究时段为 1969–2019 年。

利用经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF)分析冬季 NAO 的时空特征。利用相关分析、回归分析、合成分析以及 t 检验等方式分析 NAO 对中国东北地区冬季气温的影响及机制。

## 2 NAO 与中国东北地区冬季气温的关系

图 1 为 1969–2019 年冬季北大西洋地区( $80^{\circ} \text{W} \sim 10^{\circ} \text{E}$ ,  $20^{\circ} \text{N} \sim 90^{\circ} \text{N}$ )SLP 的 EOF 第一模态空间载荷向量分布以及冬季 NAO 指数时间序列。由图 1(a)可知,冬季北大西洋 SLP 的 EOF 第一模态方差贡献率为 52%,能够反映 NAO 的主要分布特征,其南部正位相活动中心位于亚速尔群岛地区( $20^{\circ} \text{W}$ ,  $45^{\circ} \text{N}$ ),而北部负位相活动中心则位于冰岛附近( $10^{\circ} \text{W}$ ,  $65^{\circ} \text{N}$ )。同时,由图 1(b)可知,冬季 NAO 年际和年代际变化十分明显。一方面,近几十年来 NAOI 存在明显的年际波动;另一方面,其年代际趋势同样十分明显,即在 20 世纪 70

–80 年代中期呈增强趋势,而 20 世纪 80 年代后期至 21 世纪初为减弱趋势,之后恢复增强。

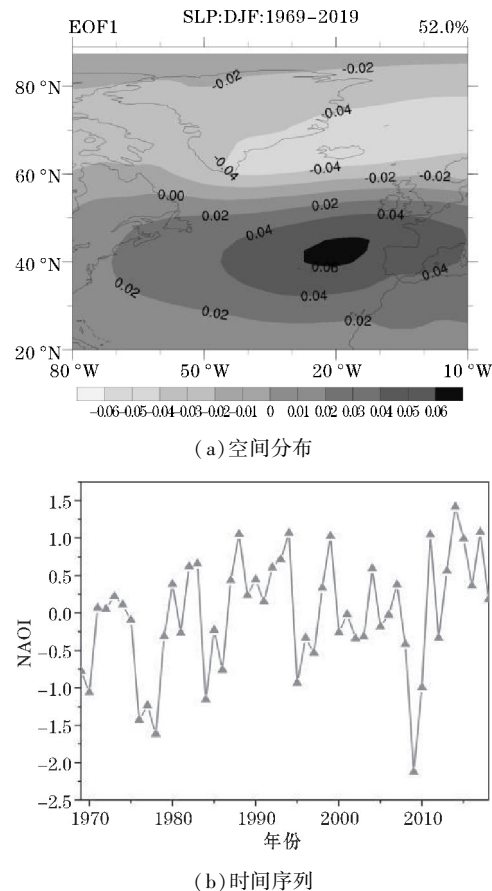


图 1 1969–2019 年冬季北大西洋地区( $80^{\circ} \text{W} \sim 10^{\circ} \text{E}$ ,  $20^{\circ} \text{N} \sim 90^{\circ} \text{N}$ ) SLP 的 EOF 第一模态空间分布和 NAOI 时间序列

为分析冬季 NAO 与中国东北地区冬季气温的联系,计算冬季 NAOI 与中国东北地区同期气温的相关系数(图 2)。从图 2 可以发现,中国东北地区冬季气温与 NAOI 为一致的正相关关系,其主要的显著正相关区位于黑龙江以及辽宁和吉林北部地区,这表明当冬季 NAOI 偏强时,中国东北地区冬季气温整体偏高,反之亦然。

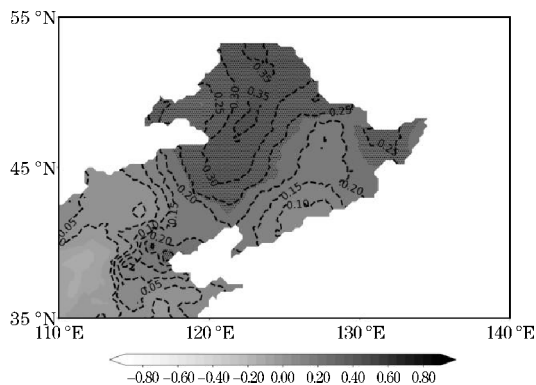


图 2 1969–2019 年冬季 NAOI 与中国东北地区同期气温相关系数分布 (打点区域代表通过 90% 的显著性检验)

3 可能的影响过程

为分析冬季 NAO 异常影响中国东亚地区冬季气温的可能过程,采用相关分析、回归分析以及合成分析等方法探讨 NAO 异常年欧亚大陆大气环流的差异。将大于 1 倍 NAOI 时间序列标准化绝对值的年份作为 NAO 活动异常年,得到强、弱 NAO 年各 6 年,强 NAO 年:1988 年、1994 年、1999 年、2011 年、2014 年、2017 年,弱 NAO 年:1970 年、1976 年、1977 年、1978 年、

1984 年、2009 年。  
图 3 为 1969–2019 年冬季 500 hPa 位势高度场与 NAOI 的相关系数分布及 NAO 强、弱年距平合成分布。从图 3(a) 可以看出,中国东北地区冬季 500 hPa 位势高度场与 NAOI 均为正相关分布,表明 NAO 越强,中国东北地区 500 hPa 位势高度越偏高。对应的 NAO 强年,亚洲中高纬西伯利亚地区均呈现位势高度正距平,表明当 NAO 偏强时,西伯利亚高压脊、东亚大槽均有所减弱,东亚地区盛行纬向环流,冷空气南下受阻,而 NAO 弱年则与之相反。

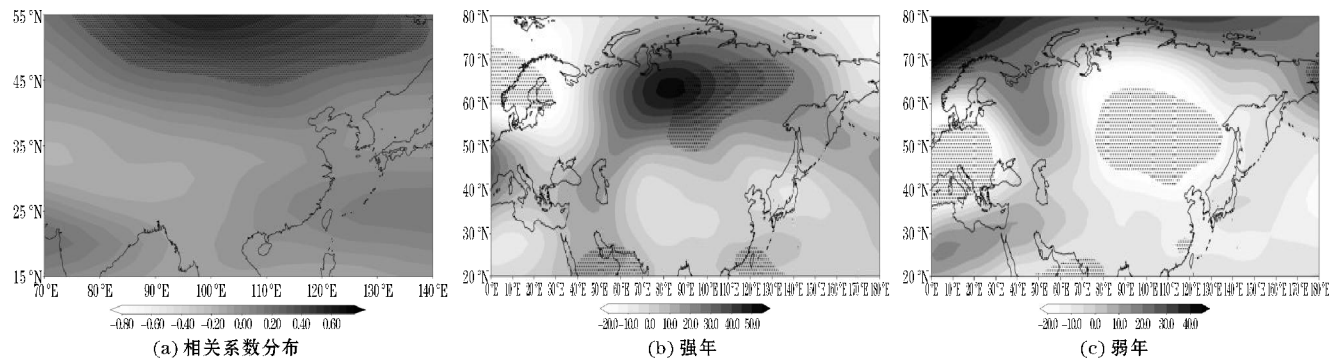


图 3 1969–2019 年冬季 NAOI 与同期 500 hPa 位势高度场的相关系数分布以及 NAO 强、弱年 500 hPa 位势高度场距平合成分布  
(打点区域代表通过 90% 的显著性水平检验)

对 NAO 强、弱年 850 hPa 高度场(图 4)进行分析。由图 4 可见,中国东北地区冬季 850 hPa 位势高度场与 NAOI 同样存在较好的正相关性,且相较于 500 hPa 位势高度场,其正相关区更广。对应的合成场上,NAO 强年欧洲地区高纬度至极区均为负距平分布,亚洲地区中高纬度以位势高度正距平为主,此时西伯利亚高压脊、东亚大槽减弱,乌拉尔山阻塞高压减弱,不利于

形成大规模冷空气南下影响中国东北地区气温,故中国东部地区冬季气温偏高。NAO 弱年,欧洲高纬度至极区为正距平所控制,亚洲地区中高纬度则为负距平,对应乌拉尔山阻塞高压偏强,有利于来自西北路径的冷空气堆积以及极涡和极区冷空气南下,从而有利于东亚地区尤其中国东北地区气温偏低。

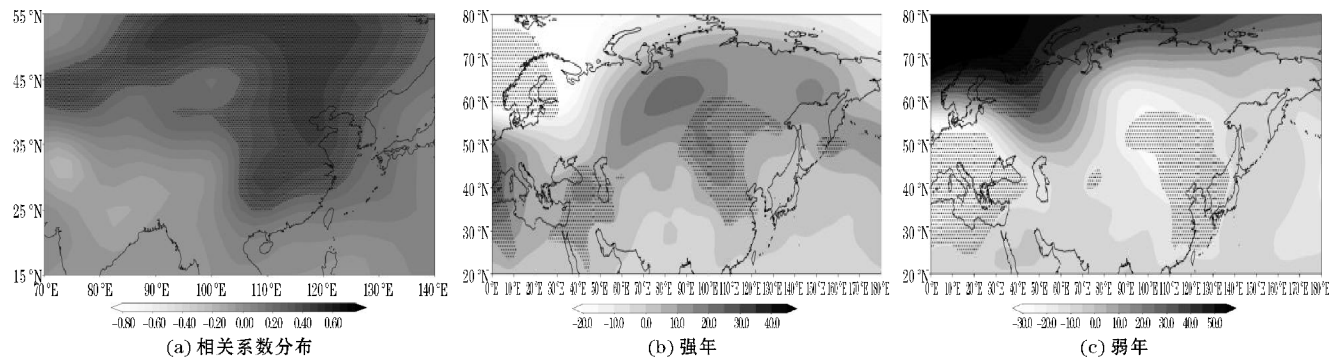


图 4 1969–2019 年冬季 NAOI 与同期 850 hPa 位势高度场的相关系数分布以及 NAO 强、弱年 850 hPa 位势高度场距平合成分布  
(打点区域代表通过 90% 的显著性水平检验)

进一步将冬季 NAO 强、弱年欧亚大陆 850 hPa 纬向风、经向风以及位势高度进行合成(图 5)。由图 5 可以发现,中国北方以及蒙古国上空 850 hPa 位势高度为显著正异常区,对应存在明显的反气旋性差值环

流,从而可形成下沉气流,导致中国东北地区气温升高,这同样表明强 NAO 年中国东北地区冬季气温有所偏高。



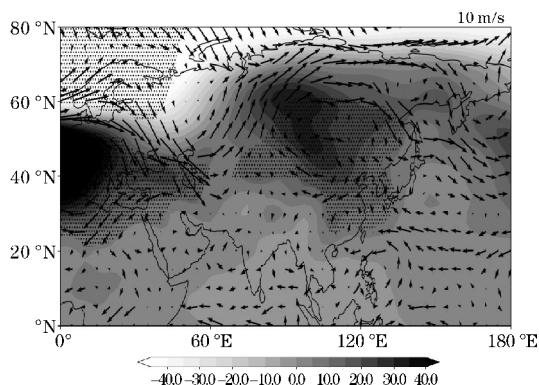
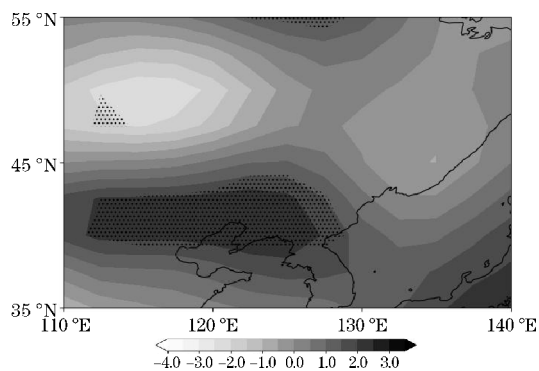
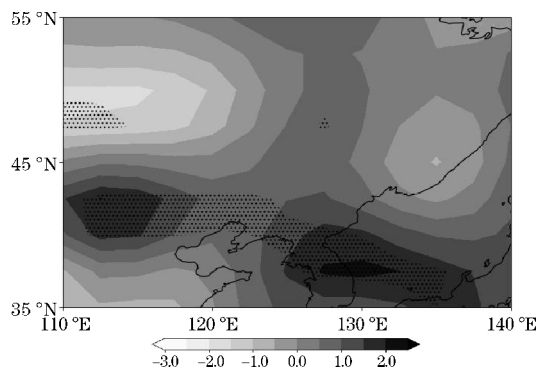


图5 1969-2019年NAO强、弱年冬季850 hPa风场和位势高度场差值图(打点区域代表通过90%的显著性水平检验)

图6为1969-2019年冬季NAO强、弱年东北亚地区500 hPa和850 hPa垂直速度合成场。同样可以发现,在500 hPa高度(图6a),当冬季NAO异常偏强时,从华北到中国东北辽宁和吉林一带,以及东北地区北部以下沉运动为主,上升运动主要位于黑龙江东部和内蒙古东部,但均未通过显著性检验,而冬季NAO异常偏弱时则与之相反。对比500 hPa高度场,850 hPa高度场合成图(图6b),中国东北地区上升运动区域范围更小,其余大部分地区均以下沉运动为主,对应气温偏高。



(a) 500 hPa



(b) 850 hPa

图6 1969-2019年冬季NAO强、弱年东北亚地区500 hPa和850 hPa垂直速度合成场(垂直速度 $\times 100$ ,打点区域代表通过90%的显著性水平检验)

图7为冬季NAO强、弱年冬季SLP差值图。从图7可以看出,亚洲大陆中高纬地区SLP主要为负异常区,而副热带至中纬度地区SLP主要为正异常分布。表明NAO强年西伯利亚高压偏弱,东亚冬季风偏弱,中国东北地区气温偏高,而NAO弱年西伯利亚高压偏强,东亚冬季风偏强,此时中国东北地区气温偏低。

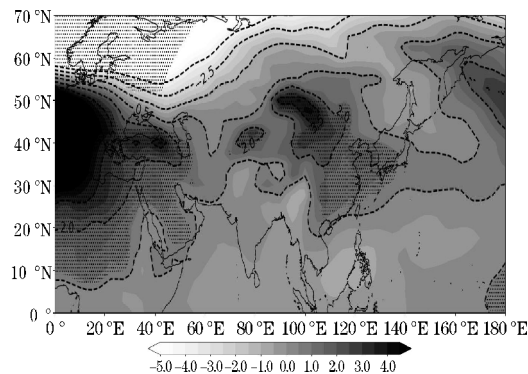


图7 1969-2019年NAO强、弱年冬季SLP差值图(打点区域代表通过90%的显著性水平检验)

上述分析表明,冬季NAO异常可通过引起欧亚大陆大气环流变异从而影响中国东北地区冬季气温。陈亚楠<sup>[24]</sup>曾发现,NAO可在年际尺度上作为背景环流影响乌拉尔山阻塞过程对欧亚低温天气的影响,即NAO弱年欧亚大陆北部降温明显,乌拉尔山阻塞环流的出现会进一步将冷空气向南输送影响中国。施春华等<sup>[25]</sup>发现NAO正位相年可通过南、北两支波列造成中国气温偏低。图8进一步给出了冬季NAOI对300 hPa位势高度场的回归及对应的波作用通量。由图8可知,300 hPa上,自北大西洋经欧亚大陆到亚洲东部存在一明显的波列结构,而对应的波作用通量场上,北大西洋地区强辐散区,其水平波作用量在高纬地区存在明显的东传过程,进入东亚地区后进一步并向南传播至太平洋地区,这与Li等<sup>[26]</sup>的研究类似,即NAO可通过“北大西洋—乌拉尔山—东亚遥相关型”这一高纬路径将其信号传播至东亚地区,从而影响东亚地区气温。

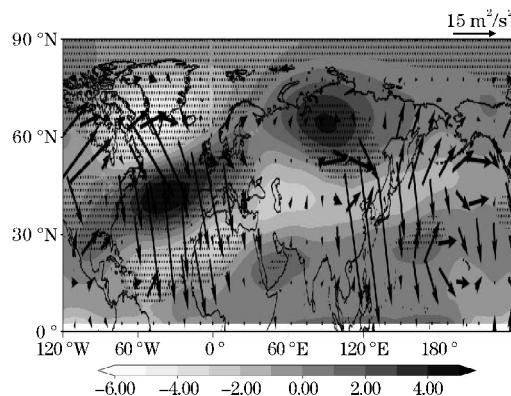


图8 1969-2019年冬季NAOI对300 hPa位势高度场的回归及波作用通量(打点区域代表通过90%的显著性水平检验)

## 4 结论

利用1969–2019年CN05.1高分辨率格点气温资料、NCEP/NCAR再分析资料及NAOI,采用经验正交分解、相关分析和合成分析等方法分析冬季NAO对中国东北地区冬季气温的影响,得到主要结论如下:

(1)冬季NAO与中国东北地区同期气温存在密切联系,当冬季NAO为正异常时,我国东北冬季气温偏高;当NAO负异常时则中国东北冬季气温偏低。

(2)东亚冬季大气环流受冬季NAO传播至东亚地区的波动所影响,波活动通量强辐散区主要位于北大西洋地区,其水平波作用量存在向东的传播路径,其向南传播至北非地区后向北传播亚洲西部地区,而后向东亚地区传播并向南传播至太平洋地区。

(3)冬季北大西洋涛动异常可通过影响对流层环流因子从而影响中国东北地区冬季气温,当北大西洋涛动正异常时,西伯利亚高压脊减弱,东亚大槽减弱,东亚地区盛行纬向环流,西伯利亚高压偏弱,东亚冬季风偏弱,且此时中国东北地区以下沉运动为主,导致中国东北地区气温偏暖。

致谢:感谢成都信息工程大学科技创新能力提升计划资助项目(KYQN202202)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter[J]. *Mon Wea Rev*, 1981, 109(4): 784–812.
- [2] Marshall J, Kushnir Y, Battisti D, et al. North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms[J]. *Inter J Climatol*, 2001, 21(15): 1863–1898.
- [3] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation[J]. *Science*, 1995, 269: 676–679.
- [4] Koslowski Loewe. The western Baltic sea ice season in terms of a mass-related severity index: 1879–1992: Part I. Temporal variability and association with the north Atlantic oscillation[J]. *Tellus A*, 1994, 64: 66–74.
- [5] Deser Walsh, Timlin. Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends[J]. *J Climate*, 2000, 13: 617–632.
- [6] 方之芳, 郭裕福, 乔琪, 等. 北极海冰减少及其与相关气象场的联系[J]. *高原气象*, 2002, 21(6): 565–575.
- [7] Ignacio, Sergio. Positive and negative phases of the wintertime North Atlantic Oscillation and drought occurrence over Europe: A multitemporal-scale approach[J]. *J Climate*, 2008, 21: 1220–1243.
- [8] Folland, Knight, Linderholm, et al. The Summer North Atlantic Oscillation: Past, present, and future[J]. *J Climate*, 2009, 22: 1082–1103.
- [9] 龚道溢, 王绍武. 大气涛动对全球低层大气环流的贡献[J]. *高原气象*, 2000, 19(4): 427–434.
- [10] 龚道溢, 王绍武. 北大西洋涛动指数的比较及其年代际变率[J]. *大气科学*, 2000, 24(2): 187–192.
- [11] Hurrell J W. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere, temperature[J]. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 665–668.
- [12] Hurrell J W, Van Loon H. Decadal variations in climate association with the North Atlantic oscillation[J]. *Climatic Change*, 1997, 36: 301–326.
- [13] Ogi M, Tachibana Y, Yamazaki K. Impact of the wintertime North Atlantic Oscillation (NAO) on the summertime atmospheric circulation[J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(13): 1701.
- [14] Yu Rucong, Zhou Tianjun. Impacts of winter-NAO on March cooling trends over subtropical Eurasia continent in the recent half century[J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: 12204.
- [15] 王永波, 施能. 近45a冬季北大西洋涛动异常与我国气候的关系[J]. *南京气象学院学报*, 2001, 24(3): 315–322.
- [16] Liu X L, Yin Z Y. Spatial and temporal variation of summer precipitation over the eastern Tibetan Plateau and the North Atlantic Oscillation[J]. *J Climate*, 2001, 14(13): 2896–2909.
- [17] 汪迁迁. 北大西洋涛动的特征及其对东亚地区气候的影响[J]. *海洋科学前沿*, 2021, 8(1): 1–10.
- [18] 韩方红, 陈海山, 马鹤翟. 冬季北大西洋涛动与中国北方极端低温相关性的年代际变化[J]. *大气科学*, 2018, 42(2): 239–250.
- [19] 邵太华, 张耀存. 冬季北大西洋涛动对中国春季降水异常的影响[J]. *高原气象*, 2012, 31(5): 1225–1233.
- [20] 唐红玉, 瞿盘茂, 常有奎. 中国春季沙尘暴频数

- 与北半球 500hPa 高度场的 SVD 分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 570–576.
- [21] 陈颖, 李维京, 史红政, 等. 北大西洋涛动对新疆冬季极端冷事件的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 348–355.
- [22] Kistler R, Kalnay E, Woollen J, et al. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(2): 247–268.
- [23] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102–1111.
- [24] 陈亚楠. 冬季北大西洋涛动和乌拉尔山阻塞环流对欧亚大陆变冷的协同影响[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(1): 12–26.
- [25] 施春华, 孙伟佳, 郭栋. WP 和 NAO 对中国东南部冬季温度的协同影响[J]. 大气科学学报, 2021, 44(3): 394–404.
- [26] Li Jian, Yu Rucong, Zhou Tianjun. Teleconnection between NAO and climate downstream of the Tibetan Plateau [J]. J Climate, 2008, 21: 4680–4690.

## The Impact of North Atlantic Oscillation on Winter Temperature in Northeastern China

FAN Zixuan<sup>1</sup>, HUA Wei<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 3. Meteorological Disaster Prediction and Warning Engineering Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** To analyze the effects of the North Atlantic Oscillation (NAO) on winter climate in northeastern China in recent decades, CN05.1 high-resolution grid point temperature data, NCEP/NCAR reanalysis data, and NAO index from 1969 to 2019 are used. The influence of NAO on winter temperature in northeastern China was analyzed by Empirical Orthogonal Function, correlation analysis and composite analysis. The results show that: (1) There is a close relationship between winter temperature and NAO in northeastern China, that is, when the winter NAO is positive, the winter temperature in northeastern China is higher, and vice versa. (2) The winter NAO can propagate to East Asia through fluctuations, thus affecting the East Asian winter atmospheric circulation. The North Atlantic region is a strong dispersion region for wave activity fluxes, and there is an eastward propagation path for the horizontal wave action in this strong dispersion region, which propagates southward to the North African region and then northward to the western Asian region, and then to the East Asian region and southward to the Pacific region. (3) The NAO anomaly in winter will affect the winter temperature in northeastern China by affecting the tropospheric circulation factors. Specifically, when the North Atlantic oscillation is a positive anomaly, the influence leads to a geopotential height positive anomaly over northern East Asia, and the East Asian winter monsoon weakens. At this time, there is an anticyclone circulation in the middle and lower troposphere, which is dominated by subsidence, resulting in warmer temperatures in the northeast of China, while the opposite is true when the North Atlantic Oscillation is a negative anomaly.

**Keywords:** North Atlantic Oscillation; Northeastern China; winter temperature; climate change; temporal and spatial variation